Durchhangstafel für Stahlaluminiumseile von veränderlichem Querschnittsverhältnis der Verbundstoffe

Autor(en): **Nather, Eugen**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Technische Mitteilungen / Schweizerische Telegraphen- und Telephonverwaltung = Bulletin technique / Administration des télégraphes et des téléphones suisses = Bollettino tecnico / Amministrazione dei telegrafi e dei telefoni svizzeri**

Band (Jahr): **8 (1930)**

Heft 5

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-873710

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Ortsnetz	Total Teilnehmer auf Ende 1929	Wovon vollständig unterirdisch angeschlossen	in %	Unterirdisch angeschlossen auf Ende 1924 in %
Zürich . . .	26152	13085	50	33
Genf	13989	8514	61	56
Basel	12387	6320	51	23
Bern	9434	3905	42	27
Lausanne . .	7497	3217	43	37
St. Gallen . .	5048	1930	38	27
Luzern . . .	3840	1528	40	11
Winterthur .	2837	801	28	7
La Chaux-de Fonds . . .	2651	1492	57	60
Biel	2533	833	33	12
Lugano . . .	2225	971	44	40
Schaffhausen.	1940	331	17	5
Neuenburg. .	1870	702	38	24
Aarau. . . .	1534	277	18	14
Solothurn . .	1515	347	23	16
Montreux . .	1497	571	38	37
Vevey . . .	1376	407	30	27
Thun	1336	248	19	10
Freiburg. . .	1206	614	51	40
Baden. . . .	1179	285	24	12
Olten	1139	300	26	21
	103185	46678	45	—

Réseau local	Nombre des abonnés fin 1929	Nombre des raccordements entièrement souterrains	en %	Nombre des raccordements souterrains fin 1924 en %
Zurich . . .	26152	13085	50	33
Genève . . .	13989	8514	61	56
Bâle	12387	6320	51	23
Berne	9434	3905	42	27
Lausanne . .	7497	3217	43	37
St-Gall . . .	5048	1930	38	27
Lucerne . . .	3840	1528	40	11
Winterthour .	2837	801	28	7
La Chaux-de-Fonds . . .	2651	1492	57	60
Bienne . . .	2533	833	33	12
Lugano . . .	2225	971	44	40
Schaffhouse .	1940	331	17	5
Neuchâtel . .	1870	702	38	24
Aarau . . .	1534	277	18	14
Soleure . . .	1515	347	23	16
Montreux . .	1497	571	38	37
Vevey . . .	1376	407	30	27
Thoune . . .	1336	248	19	10
Fribourg . .	1206	614	51	40
Baden. . . .	1179	285	24	12
Olten	1139	300	26	21
	103185	46678	45	—

Durchhangstafel für Stahlaluminiumseile von veränderlichem Querschnittsverhältnis der Verbundstoffe.

Von Ing. Dr. Eugen Nather, Wien.

Bei den gewöhnlichen Freileitungsbronzen aus Kupfer und Aluminium wird die Qualitätsverbesserung des Reinmetalls durch so geringe Legierungszusätze erzielt, dass Eigengewicht und Wärmedehnwert für Reinmetall und Legierung praktisch übereinstimmen; es ändert sich bloss der Elastizitätsmodul merklich [1]).

Nicht ebenso einfach liegen die analogen Verhältnisse bei Stahlaluminiumseilen, wenn man deren Zerreissfestigkeit für gewisse Zwecke erhöhen will durch dickere Stahleinlagen; z. B. dort, wo die Hochspannungsleiter örtlich, wie bei Talüberspannungen etc. widerstandsfähiger ausgeführt werden sollen, oder wo sich stärkere Stahlkerne mit Rücksicht auf den besonderen Verwendungszweck empfehlen, indem die Seile als Erdseile und gleichzeitig auch als durchgehende wirksame Mastverspannung dienen sollen [2]).

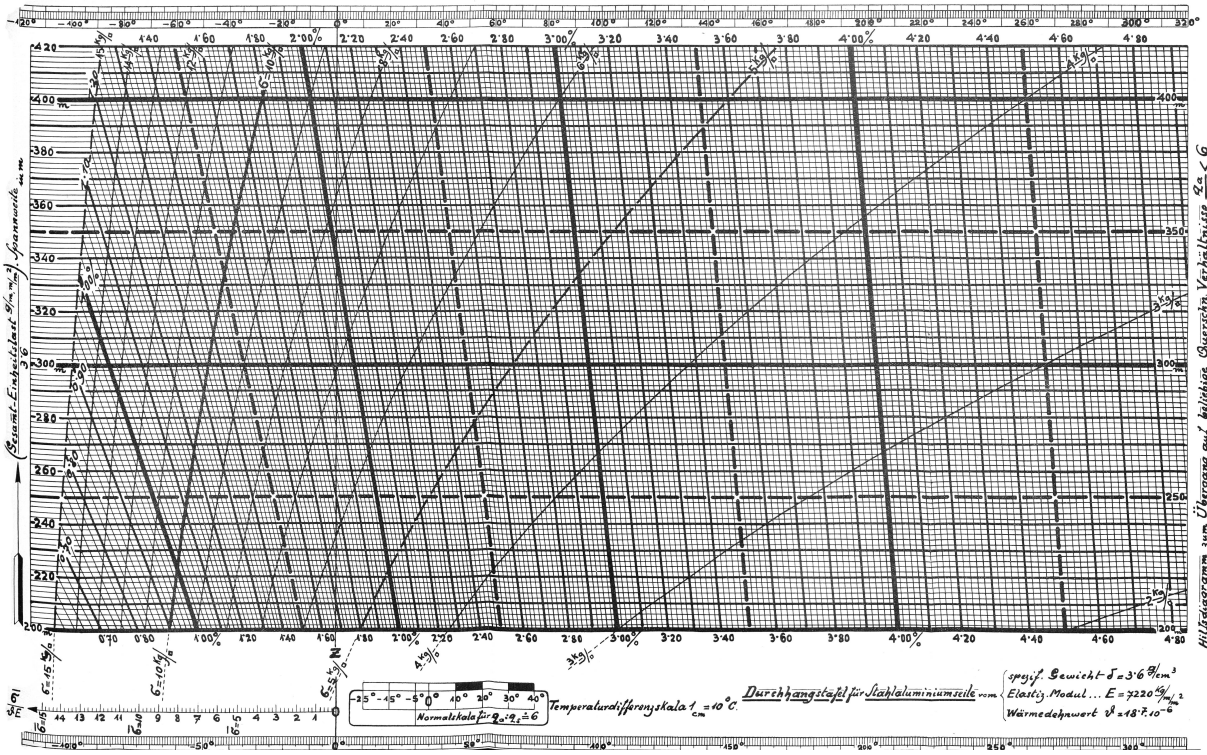
[1]) Neben der bedeutenden Erhöhung der Zerreissfestigkeit, die eben der Zweck der Legierung ist.

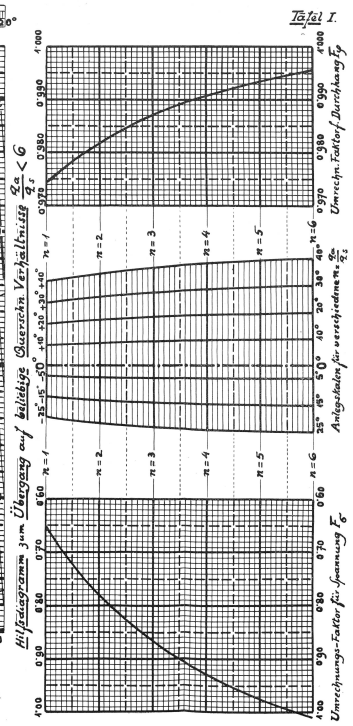
Während normalerweise aus ökonomischen Rücksichten ein Verhältnis von rund 6 : 1 zwischen *Al*- und Stahl-Querschnitt zur Ausführung kommen wird, kann es sich für Sonderfälle empfehlen, auf die älteren Querschnittsverhältnisse wie 4 : 1, 3 : 1 zurückzugreifen, von welchen der Stahlaluminiumleitungsbau vor Jahren aus Vorsichts- bzw. Sicherheitsgründen ausgegangen ist.

Zur Durchhangsermittlung von Freileitungen aus *Cu*- und *Al*-Bronzen kann ganz gut eine für das Reinmetall entworfene Singertafel dienen; das mechanische Umrechnungsverfahren ist dabei deshalb relativ einfach und übersichtlich, weil ja Legierung und Reinmetall in den massgebenden Materialeigenschaften — mit alleiniger Ausnahme des Elastizitätsmoduls — praktisch übereinstimmen.

[2]) Siehe die Ausführungen von Dr. Beck (E. u. M. 1926, S. 768) und die detaillierten Angaben von Kvetensky (E. u. M. 1927, S. 29); vgl. auch E. u. M. 1918, S. 307, rechte Spalte, Punkt 4 (Erdseile mit Aussenlage aus nichtmagnetischem Material).

Tafel I.


Gesamt-Einheitslast g/m m² Spannweite in m
Temperaturdifferenzskala 1 cm = 10° C.
Normalskala für σ₀ = σ₂ = 6
Durchhangstafel für Stahlaluminiumseile
spezif. Gewicht δ = 3·6 g/cm³
Elastiz. Modul ... E = 7220 kg/mm²
Wärmedehnwert ϑ = 18·7 · 10⁻⁶


Hilfsdiagramm zum Übergang auf beliebige Querschn. Verhältnisse σa/σ
Umrechnungs-Faktor für Spannung Fσ
Anhaltswerte für verschiedene n = σa/σ₀
Umrechnungs-Faktor für Durchhang Fy

Bei Stahlaluminiumseilen dagegen ändern sich bei einem Wechsel des Seilaufbaues alle drei mitwirksamen Materialeigenschaften: elastische Dehnung, Wärme-Dehnung, Eigengewicht (für die Seilkombination als Ganzes). Mit einem einzigen Umrechnungsfaktor, wie bei *Cu*- und *Al*-Legierungen, ist hier im allgemeinen nicht mehr das Auslangen zu finden, wenn man anhand einer Singertafel für bestimmtes Querschnittsverhältnis $\frac{q_a}{q_s} = n$ ein Stahlaluminiumseil von abweichendem n berechnen will.

Indessen werden für viele praktische Fälle doch derartige Fabrikationsverhältnisse vorliegen, dass eine solche Veränderlichkeit des Querschnittsverhältnisses n in der Singertafel ohne ein Uebermass von Umrechnungen berücksichtigt werden kann.

Damit letzteres ermöglicht wird, braucht in der Fabrikation bloss folgender Punkt erfüllt zu sein: es muss für Stahlaluminiumseile mit normalem Querschnittsverhältnis und für jene mit abweichenden Querschnittsverhältnissen doch stets ein und dieselbe Stahlsorte verwendet werden; dadurch wird erzielt, dass für die verschiedensten Querschnittsverhältnisse n doch immer mit konstanten *Al*-Festwerten (δ_a, E_a, ϑ_a) und konstanten Stahl-Festwerten (δ_s, E_s, ϑ_s) gerechnet werden kann. Es lassen sich dann für sämtliche noch möglichen Querschnittsverhältnisse zum voraus die kombinierten Festwerte für Eigengewicht, Elastizitätsmodul und Wärmedehnwert ermitteln und ein für allemal graphisch zusammenstellen. Legt man dieser Ermittlung z. B. die österreichischen Freileitungsnormalien zugrunde, so ergeben sich aus den bekannten Formeln für die kombinierten (auf den Gesamtquerschnitt der Verbundseile bezogenen) Eigengewichts-, Elastizitäts- und Wärmedehnwerte, nämlich

$$\delta = \frac{\delta_s + n\,\delta_a}{1 + n} \quad \ldots \quad (1)$$

$$E = \frac{E_s + n\,E_a}{1 + n} \quad \ldots \quad (2)$$

$$\vartheta = \frac{\vartheta_s\,E_s + n\,\vartheta_a\,E_a}{E_s + n\,E_a} \quad \ldots \quad (3)$$

die in Abb. 1 zusammengestellten Werte [3]).

Mit den Werten der Abb. 1 ist einzugehen in die allgemeinen Umrechnungsfaktoren, die von Singer angegeben wurden für den allgemeinsten Fall, dass die Leiterfestwerte abweichen von allen Annahmen, die der Tafel zugrundegelegt wurden. Für Stahlaluminiumseile nach den österreichischen Normalien schreiben sich diese Umrechnungsfaktoren, wenn Index „*Ta*" andeutet, dass ein Wert in der Tafel abzulesen bzw. der Tafel zugrunde gelegt ist:

Umrechnungsfaktor für Spannung:

$$F_\sigma = \sqrt[3]{\frac{E_{Ta}}{E}\left(\frac{\delta_{Ta}}{\delta}\right)^2} = \sqrt[3]{\frac{7220}{E}\left(\frac{3{,}6}{\delta}\right)^2} = \sqrt[3]{93{,}57\left\{\frac{1}{\frac{E}{1000}\cdot\delta^2}\right\}}$$

Umrechnungsfaktor für Temperatur:

$$F_t = \frac{\vartheta}{\vartheta_{Ta}}\sqrt[3]{\left\{\frac{E}{E_{Ta}}\left(\frac{\delta_{Ta}}{\delta}\right)\right\}^2} = \frac{\vartheta}{18{,}7\cdot 10^{-6}}\sqrt[3]{\left\{\frac{E}{\delta}\cdot\frac{3{,}6}{7220}\right\}^2} = \frac{\vartheta}{18{,}7\cdot 10^{-6}}\sqrt[3]{\left\{0{,}4986\,\frac{E}{\frac{1000}{\delta}}\right\}^2}$$

Umrechnungsfaktor für Durchhang:

$$F_\varphi = \sqrt[3]{\frac{E_{Ta}}{E}\cdot\frac{\delta}{\delta_{Ta}}} = \sqrt[3]{\frac{7220}{3{,}6}\cdot\frac{1}{\frac{E}{\delta}}} = \sqrt[3]{\left\{\frac{1}{\frac{E}{\frac{1000}{\delta}}}\right\}\cdot 2{,}0055}$$

Werden aus Abb. 1 für verschiedene n die entsprechenden δ, E, ϑ-Werte in die vorstehenden Umrechnungsfaktoren eingesetzt, so lassen sich diese Faktoren F in Abhängigkeit von n graphisch zusammenstellen, laut „Hilfsdiagramm zum Uebergang auf abweichende Querschnittsverhältnisse $\frac{q_a}{q_s} < 6$" in Tafel I [4]).

Auffällig in letzterem Hilfsdiagramm ist die $F\varphi$-Kurve: für Querschnittsverhältnisse n, die vom Normalwert (*d. i.* 6) bis gegen 4 und 3 herunter reichen, unterscheidet sich das $F\,\varphi$ vom Wert 1 nur wenig; die Abweichung beträgt bis zu den erwähnten Grenzwerten nur rund 1%; daraus folgt, dass für Vorprojektsrechnungen, bei welchen eine Ungenauigkeit von 1% keine Rolle spielt, die letzte Umrechnung (der Durchhangswerte nämlich) überhaupt entfallen kann; der mechanische Umrechnungsvorgang für Stahlaluminiumseilrechnung ist in solchen Fällen dann überaus einfach: man liest, wenn es sich um ein bestimmtes abweichendes Querschnittsverhältnis n handelt, aus dem Hilfsdiagramm der Tafel I unmittelbar den Umrechnungsfaktor F_σ ab (welcher diesem n entspricht) und greift die zu n gehörige Anlegskala ab [5]). Wird diese Skala in der Tafel entsprechend angelegt, so stellen die erhaltenen φ-Ablesungen schon die wirklichen Durchhangs-Prozentsätze dar, wie erwähnt unter der Voraussetzung, dass 1% Ungenauigkeit dabei in Kauf genommen werden kann [6]).

[3]) Nach den österreichischen Vorschriften für Freileitungen gilt für Stahl: Eigengewicht $\delta_s = 8$ g/cm³, Elastizitätsmodul $E_s = 18{,}000$ kg/mm², Wärmedehnwert $\vartheta_s = 11\cdot 10^{-6}$. Für *Al* gilt: $\delta_a = 2{,}8$ g/cm³, $E_a = 5400$ kg/mm², $\vartheta_a = 23\cdot 10^{-6}$ (E. u. M. 1927, S. 241).

[4]) Dieses Hilfsdiagramm ist analog zu handhaben wie das Hilfsdiagramm in Techn. Mitt. T. T. 1930, Nr. 1, Tafel I.

[5]) Analog dem für *Al*-Legierungen beschriebenen Vorgang (Techn. Mitt. T. T. 1930, S. 1 ff.).

[6]) Als Anomalie ist am Hilfsdiagramm folgendes auffällig: $F\,\varphi$ sollte für die der Tafel zugrunde gelegten Annahmen allmählich übergehen in den Wert 1; statt dessen besteht hier eine Unstetigkeit, nämlich ein Sprung von 0.9955 auf 1. Dies rührt daher, dass die Festwerte $\delta = 3{,}6$, $E = 7220$ nicht in jeder Hinsicht entsprechend abgerundet worden sind; dem Wert

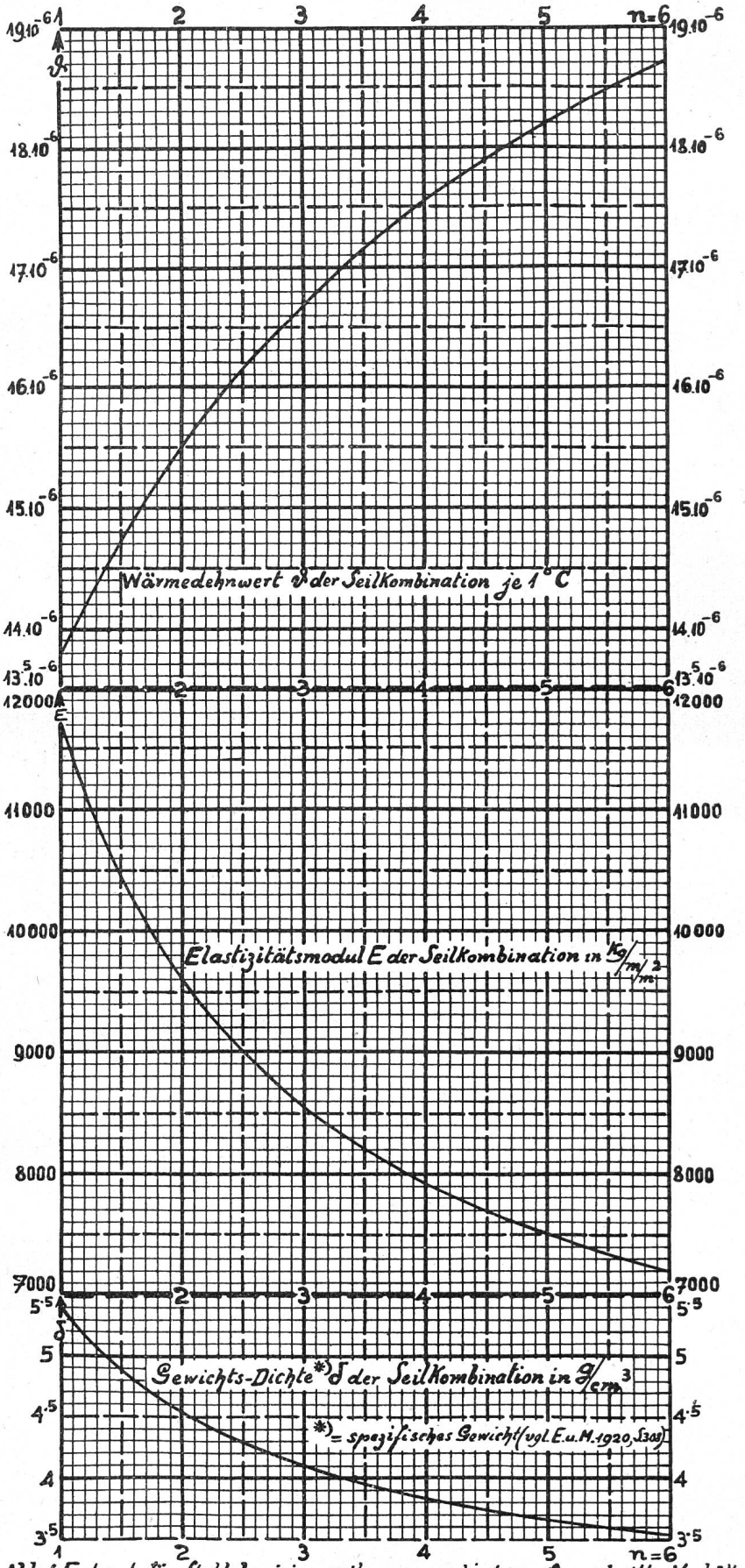


Abb. 1. Festwerte für Stahlaluminiumseile von verschiedenem Querschnitts-Verhältnis n; $E_s = 18000\ kg/mm^2$, $\delta_s = 8\ g/cm^3$, $\vartheta_s = 11.10^{-6}$; $E_a = 5400\ kg/mm^2$, $\delta_a = 2.8\ g/cm^3$, $\vartheta_a = 23.10^{-6}$

Die Tafelanwendung soll an drei Zahlenbeispielen gezeigt werden, wobei der Vollständigkeit halber auch auf den allgemeinen Fall eingegangen wird, dass nicht nur das n der Verbundseile sich ändert, sondern auch die Festwerte der einzelnen Verbundstoffe selbst verschieden angenommen werden können.

Ausgangspunkt der Durchhangsermittlung für Leiter aus einem einzigen Baustoff ist die Bestimmung der kritischen Spannweite. Da diese für Verbundseile nicht ebenso einfach ist wie für Homogenseile, soll den Zahlenbeispielen eine kurze Bemerkung über die kritische Spannweite bei Verbundseilen vorausgeschickt werden.

Vorbemerkung über die kritischen Spannweiten (nach Berling und Weil) *bei Verbundseilen.*

Bekanntlich unterscheidet man bei Seilen aus bloss einem Baustoff nur zwei Arten von Spannweiten (für das ganze Spannweitengebiet von $a = o$ bis $a = \infty$): das unterkritische Gebiet (von $a = o$ bis $a = a_{kr}$ d. h. bis zur kritischen Spannweite nach Weil) [7]) und das oberkritische Gebiet (von $a = a_{kr}$ bis $a = \infty$).

Bei Verbundseilen schiebt sich bekanntlich ein drittes Gebiet ein zwischen die grössten Spannweiten, welche oberkritisches Verhalten im gewöhnlichen Sinn zeigen, und die kleinsten Spannweiten, die sich unterkritisch im gewöhnlichen Sinn verhalten.[8]) Das oberkritisch im gewöhnlichen Sinn soll dabei verstanden sein wie folgt: Höchstmaterialbeanspruchung und Höchstseilzug tritt ein bei Zusatzlast; analog soll „unterkritisch im gewöhnlichen Sinn" so verstanden sein: Höchstmaterialbeanspruchung und Höchstseilzug tritt ein bei Tiefsttemperatur (ohne Zusatzlast).

Das vorerwähnte Zwischengebiet (zwischen rein oberkritisch und rein unterkritisch [9]) liegt zwischen zwei Grenzen: der kritischen Spannweite nach Weil (a_{kr}) und der kritischen Spannweite nach Berling ($a_{kr,\,B}$). Ist die Spannweite eines Verbundseils grösser als der Berlingwert $a_{kr,\,B}$, so heisst das: Höchst-Aluminiumbeanspruchung und konstanter Höchstseilzug treten ein für Zusatzlast. Ist die Spannweite des Verbundseils kleiner als der Weil'sche Wert a_{kr}, so heisst das: Höchst-Aluminiumbeanspruchung und konstanter Höchstseilzug treten ein bei Tiefsttemperatur. Bei Verbundseilen hat also das „oberkritisch gemäss $a > a_{kr,\,B}$" und das „unterkritisch gemäss $a < a_{kr}$" stets einen doppelten Sinn: hinsichtlich *Al-Mantel* allein und hinsichtlich *Seilkombination* als Ganzes. Dagegen zeigen die Spannweiten des genannten Zwischengebietes (für $a_{kr} < a < a_{kr,\,B}$) ein *unter*kritisches Verhalten bezüglich des *Al*-Mantels [10]), dabei aber gleichzeitig eine Art *ober*kritisches Verhalten bezüglich der Seilkombination als solcher, sofern nämlich die Höchstseilspannung, die hier allerdings keine Konstante mehr ist, bei Zusatzlast eintritt, so dass man dieses Band von Spannweiten auch als gemischtkritisches Gebiet ansprechen kann.

In Abb. 2 soll andeuten: a_{kr} die kritische Spannweite nach Weil, $a_{kr,\,B}$ die kritische Spannweite nach Berling; bei der Spannung σ soll der ringförmige Index ○ andeuten, dass vom gesamten Seilquerschnitt bloss der *Al*-Ring gerade *voll* ausgenützt d. h. mit der höchstzulässigen Beanspruchung angespannt ist. Der Abb. 2 ist zusammenfassend, im Sinne des Vorstehenden, zu entnehmen: Die Spannweiten von o bis a_{kr} sind *unter*kritisch bezüglich *Al* und Seilkombination ($U_{Al,\,S.\,K.}$), denn es ist $\sigma^{\circ}_{-25} > \bar{\sigma}$ $\{$ *Al* und Seil bei — 25° maximal (und zwar konstant) beansprucht $\}$; die Spann-

3,6 würde $E = 7340$ entsprechen, dem Wert 7220 wiederum ein $\delta = 3{,}55$ bei genauer Ermittlung (vgl. Abb. 1); die Wertekombination $\delta = 3{,}6$, $E = 7340$ würde einem Seil von $n = 5{,}5$ entsprechen, die Kombination $\delta = 3{,}55$, $E = 7220$ einem Seil von $n = 5{,}92$. Auf gleiche Weise erklärt sich, dass die $F\sigma$-Kurve den Wert 1 schon bei $n = 5{,}65$ erreicht.

[7]) $a_{kr} = \sigma_{max}\sqrt{\dfrac{24\ (10^6\,\vartheta)\ (\bar{t} - t_{min})}{\bar{\delta}^2 - \delta^2}}$

[8]) Vgl. Dr. Riedlinger, Allgemeine Rechentafeln zur Ermittlung von Beanspruchung und Durchhang sämtlicher Verbundseile (E. u. M. 1924, S. 421).

[9]) Das heisst zwischen ober- und unterkritisch im gewöhnlichen Sinne.

[10]) Höchst-*Al*-Beanspruchung bei Tiefsttemperatur.

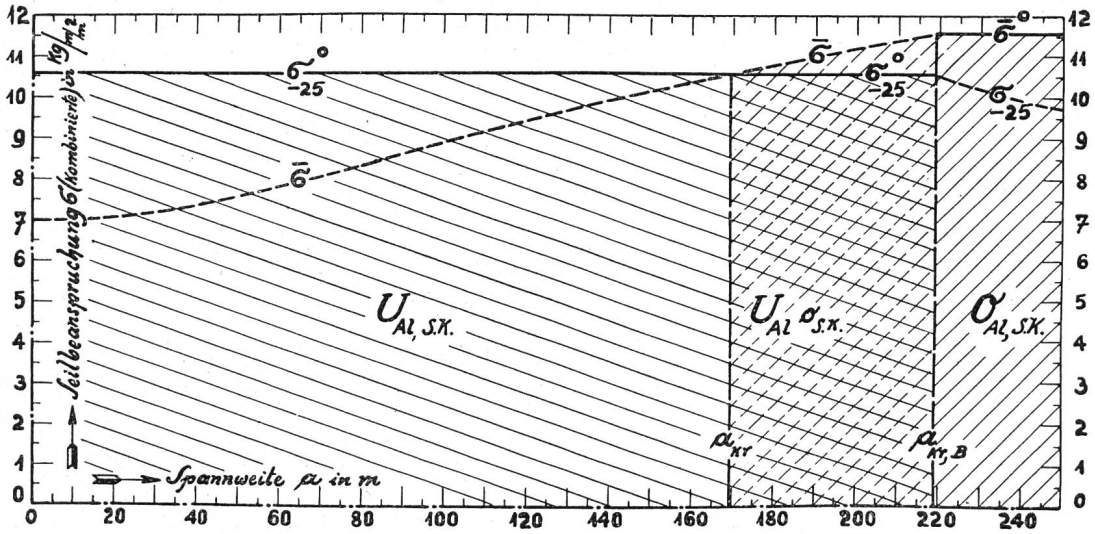


Abb. 2. Tiefsttemperatur-μ. Zusatzlast-Spannung für $\frac{49 \cdot 5^{\square}}{212 \cdot 1^{\square}}$ Stahl-Al-Seil bei verschiedenen Spannweiten.

weiten von a_{kr} bis $a_{kr,\,B}$ sind *unter*kritisch für *Al* und *in gewissem Sinn ober*kritisch für die Seilkombination ($U_{Al,\,o_{S.\,K.}}$), denn es ist $\bar{\sigma} > \sigma^{\circ}_{-25}$ { *Al* bei Tiefsttemperatur maximal (und zwar konstant) beansprucht, dagegen variabler Höchstseilzug bei Zusatzlast ($q\,\bar{\sigma}$) [11]; $\bar{\sigma}$ ansteigend von σ°_{-25} bis zu $\bar{\sigma}^{\circ}$ }; im letzten Bereich (von $a_{kr,\,B}$ bis $a = \infty$) ist jede Spannweite *ober*kritisch für *Al* und Seilkombination ($O_{Al,\,S.\,K.}$), denn es ist $\bar{\sigma}^{\circ} > \sigma_{-25}$ { *Al* und Seil bei Zusatzlast maximal (und zwar konstant) beansprucht }.

Fall I: Stahlaluminiumseil, übereinstimmend mit sämtlichen Durchhangstafelannahmen (im n wie in den δ-, E-, ϑ-Werten der Verbundstoffe).

Das Stahlaluminiumseil soll äquivalent sein einem Hartkupferseil vom Querschnitt 70 mm² (*Cu*-Seil-$\varnothing$ = 10,5 mm). [12]

Stahlaluminiumseil-Durchmesser d = 15,8 mm
,, -Gesamtquerschnitt q = 143,5 mm²
Al-Querschnitt q_a = 122,6 ,,
(26 Drähte à 2,45 mm $\varnothing$)
Stahl-Querschnitt q_s = 22,9 mm²
(7 Drähte à 1,95 mm $\varnothing$)

$$\text{Querschnittsverhältnis } \frac{q_a}{q_s} \doteq 6 \text{ [13]}.$$

Nach den österreichischen Vorschriften für Freileitungen [14]) gelten für normalisierte Stahlaluminiumseile folgende (auf die Seilkombination bezogene) Mittelwerte:

(Kombinierter) Seil-Eigengewichtswert δ = 3,6 g/cm³
,, Seil-Elastizitätsmodul E = 7220 kg/mm²
,, Seil-Wärmedehnwert ϑ = 18,7 · 10⁻⁶

Die Seilrechnung sei durchzuführen für die Forderung: Im *Al*-Mantel soll keinesfalls die Beanspruchung $\sigma_{a,\,max}$ = 6,85 kg/mm² [15]) überschritten werden, und zwar weder bei — 25° *C* ohne Zusatzlast noch bei — 5° *C* plus Zusatzlast [16]).

Es ist nun zu entscheiden: Fällt die 200-m-Spannweite in den oberkritischen, unterkritischen oder gemischtkritischen Bereich? Zu diesem Zwecke kann man ausgehen von den Grenzspannungen für Aluminiumausnützung, die bei verschiedenen Spannweiten überhaupt möglich sind (nach Abb. 2); mit diesen Grenzspannungen wird dann vorerst einzugehen sein in die Berling'sche Gleichung für die kritische Spannweite und weiter — falls erforderlich — auch noch in die Weil'sche Gleichung (für die kritische Spannweite).

[11]) Die kombinierte Spannung für Zusatzlast ist bisher (für Bereich $U_{Al,\,S.\,K.}$ und Bereich $U_{Al,\,o_{S.\,K.}}$) mit $\bar{\sigma}$ ohne den Index ° bezeichnet worden, weil sie nicht mit *Al*-Ausnutzung verbunden ist: $\bar{\sigma} < \bar{\sigma}^{\circ}$.

[12]) Als Spannweite ist hier sowie in den folgenden Beispielen a = 200 m vorausgesetzt.

[13]) $n = 6$ ist der ungefähre Mittelwert (nach den österreichischen Normalien); genauer ist (für den vorliegenden Fall) $n = 5{,}867$, $\frac{1}{n} = 0{,}1705$.

[14]) E. u M. 1927, S. 241.

[15]) Für Aluminium ist die Bruchlast: 19 kg/mm² (Einzeldrähte), 17,1 kg/mm² (Seile); bei 2½facher Bruchsicherheit ist höchstens zulässig $\frac{17{,}1}{2{,}5} \doteq 6{,}85$ kg/mm².

[16]) Zusatzlast $= 180 \sqrt{d} = 180 \sqrt{15{,}8} = 715{,}5 \frac{\text{Gramm}}{m}$;

damit folgt als:

Eigengewicht einschliesslich Zusatzlast $\bar{\delta} = 3{,}6 + \frac{715{,}5}{143{,}5} = 8{,}586$ kg/mm²,

Aneisungsverhältnis $\varkappa = \frac{\bar{\delta}}{\delta} = \frac{8{,}586}{3{,}6} = 2{,}384$.

[17]) Unter a) und b) sowie in der Berling-Formel für $a_{kr,\,B}$ soll, obwohl eine Häufung von Indices im allgemeinen unerwünscht ist, doch genau angedeutet werden, um welche Spannungen es sich jeweils handelt: Kreisring ○ soll, wie bereits

Grenzspannungen für *Al*-Ausnützung bei { *a)* Tiefsttemperatur und den kleinsten Spannweiten; *b)* Zusatzlast und den grössten Spannweiten }

a) bei Tiefsttemperatur (−25°) und Kleinstspannweiten

Stahl-Grenzspannung: [18])

$$\sigma^{\circ}_{s,\,-25,\,(K.)} = \frac{E_s}{E_a} \cdot \sigma_{a,\,max} + (\vartheta_a - \vartheta_s)\, E_s\, (t_{min} - t_v) =$$

$$\underbrace{\frac{18000}{5400}}_{1/3} \cdot 6{,}85 + \underbrace{(23 - 11)\, 10^{-6} \cdot 18 \cdot 10^{-3}}_{0{,}216} (-25 - 15) =$$

$$22{,}833 - 8{,}64 = 14{,}19 \text{ kg/mm}^2$$

Seil-Grenzspannung (kombinierte): [20])

$$\sigma^{\circ}_{-25,\,(K.)} = \frac{\sigma_{a,\,max}}{1 + \frac{1}{n}} + \frac{\sigma^{\circ}_{s,\,-25\,(K.)}}{1 + n} =$$

$$\frac{6{,}85}{\underbrace{1 + 0{,}1705}_{5{,}852}} + \frac{14{,}19}{1 + 5{,}867} = 7{,}93 \text{ kg/mm}^2$$

b) bei Zusatzlast und Grösstspannweiten [17])

Stahl-Grenzspannung: [19])

$$\bar{\sigma}^{\circ}_{s,\,(G.)} = \frac{E_s}{E_a} \cdot \sigma_{a,\,max} + (\vartheta_a - \vartheta_s)\, E_s\, (\bar{t} - t_v) =$$

$$\frac{1}{3} \cdot 6{,}85 + 0{,}216\, (-5 - 15) =$$

$$22{,}833 - 4{,}32 = 18{,}51 \text{ kg/mm}^2$$

Seil-Grenzspannung (kombinierte): [20])

$$\bar{\sigma}^{\circ}_{(G.)} = \frac{\sigma_{a,\,max}}{1 + \frac{1}{n}} + \frac{\bar{\sigma}^{\circ}_{s,\,(G.)}}{1 + n} =$$

$$5{,}852 + \frac{18{,}51}{6{,}867} = 8{,}56 \text{ kg/mm}^2$$

Mit diesen Grenzspannungen (für die Seilkombination) ist einzugehen in die Berling'sche Gleichung für die kritische Spannweite:

$$a_{\mathrm{kr,\,B}} = 100 \sqrt{\frac{\bar{\sigma}^{\circ}_{(\mathrm{G.})} - \sigma^{\circ}_{-25,\,(\mathrm{K.})} + \vartheta\, E\, [\bar{t} - t_{\min}]}{\frac{E}{2400}\left\{\left(\frac{\bar{\delta}}{\bar{\sigma}^{\circ}_{(\mathrm{G.})}}\right)^2 - \left(\frac{\delta}{\sigma^{\circ}_{-25,\,(\mathrm{K.})}}\right)^2\right\}}} = 100 \sqrt{\frac{8{,}56 - 7{,}93 + 0{,}135\,[-5 - (-25)]}{3{,}008\left\{\left(\frac{8{,}586}{8{,}56}\right)^2 - \left(\frac{3{,}6}{7{,}93}\right)^2\right\}}} = 118\,\mathrm{m}$$

Unser 200 m-Feld ist also *ober*kritisch, d. h.: *Al*-Ausnützung wird erreicht bei Zusatzlast und es ist die dann auftretende Höchstseilspannung $\bar{\sigma}$ identisch mit der zuvor ermittelten Grenzspannung $\bar{\sigma}^{\circ}_{(\mathrm{G.})}$ d. h.:

Ausgangsspannung $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}^{\circ}_{(\mathrm{G.})} = 8.56\ \mathrm{kg/mm^2}$. [21]) Bei Tiefsttemperatur wird das Aluminium hier nicht mehr voll ausgenützt; die wirklich auftretende Tiefsttemperaturspannung ist kleiner als die vorher — ohne Rücksicht auf die gegebene Spannweite — ermittelte Grenzspannung $\sigma^{\circ}_{-25,\,(\mathrm{K.})}$; das wirklich auftretende σ_{-25} ist entweder aus der Zustandsgleichung oder graphisch zu ermitteln.

Der Ausgangspunkt für die Ermittlung nach dem Singerverfahren liegt beim Schnitt der Parabel $\bar{\sigma} = 8{,}56\ \mathrm{kg/mm^2}$ mit der Wagrechten $za = 2{,}385 \cdot 200 = 477$ m; dieser Punkt $\bar{A}_{-5}$ ist herabzuloten nach Punkt A_{-5} (Abb. 3) [22]); hier ist anzulegen (mit -5^0) die Normalskala der Tafel I, wonach man folgende φ als wirkliche Durchhangsprozentsatz-Werte ablesen kann:

erwähnt, andeuten, dass der Aluminium-Mantel gerade voll ausgenützt wird. Durch die Abkürzung (*K.*) für Kleinstspannweiten bzw. (*G.*) für Grösstspannweiten soll angedeutet werden, dass es vorerst noch unsicher ist, ob diese Spannungen für die gegebene Spannweite tatsächlich auftreten werden; zum voraus ist nur bekannt, dass sich eine mit (*K.*) bezeichnete Spannung sicher dann wirklich einstellen wird, wenn die Spannweite sehr klein vorausgesetzt ist (d. h. für Kleinstspannweiten) bzw. eine mit (*G.*) bezeichnete Spannung dann wirklich auftreten wird, wenn die Spannweite genügend gross angenommen ist (Grösstspannweiten).

[18]) Bekanntlich ist, wenn t_{V} die Verseiltemperatur bedeutet, die Teilspannung im Stahl:

$$\sigma_{\mathrm{s}} = \frac{E_{\mathrm{s}}}{E_{\mathrm{a}}} \cdot \sigma_{\mathrm{a,\,max}} + (\vartheta_{\mathrm{a}} - \vartheta_{\mathrm{s}})\, E_{\mathrm{s}}\, (t - t_{\mathrm{V}}) \text{ bei Temperatur } t$$

$$\sigma_{\mathrm{s},\,-25} = \frac{E_{\mathrm{s}}}{E_{\mathrm{a}}} \cdot \sigma_{\mathrm{a,\,max}} + (\vartheta_{\mathrm{a}} - \vartheta_{\mathrm{s}})\, E_{\mathrm{s}}\, (t_{\min} - t_{\mathrm{V}}) \text{ bei Tiefsttemperatur.}$$

[19]) Im Sinne von Fussnote [18]) gilt für die Teilspannung im Stahl bei Zusatzlast (wenn $\bar{t}$ = Zusatzlasttemperatur):

$$\bar{\sigma}_{\mathrm{s}} = \frac{E_{\mathrm{s}}}{E_{\mathrm{a}}} \cdot \sigma_{\mathrm{a,\,max}} + (\vartheta_{\mathrm{a}} - \vartheta_{\mathrm{s}})\, E_{\mathrm{s}}\, (\bar{t} - t_{\mathrm{V}})$$

[20]) Für die Gesamtseilspannung (auch kombinierte Seilspannung bzw. Gleichspannung genannt) gilt bekanntlich:

$$\sigma_{-25} = \frac{\sigma_{\mathrm{a,\,max}}}{1 + \frac{1}{n}} + \frac{\sigma_{\mathrm{s},\,-25^0}}{1 + n} \text{ bei Tiefsttemperatur}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_{\mathrm{a,\,max}}}{1 + \frac{1}{n}} + \frac{\bar{\sigma}_{\mathrm{s}}}{1 + n} \text{ bei Zusatzlast}$$

[21]) Auch für das Seil als Ganzes wird der Höchstseilzug erreicht bei Zusatzlast d. h. $S_{\max} = \bar{S} = q \cdot \bar{\sigma} = 143{,}5 \cdot 8{,}56 = 1228$ kg.

[22]) Rechnerisch folgt der Abstand des Punktes A_{-5} von der Z-Linie aus:

$$Z \div A_{-5} = \frac{1}{24\,(10^6\,\vartheta)} \left(\frac{a\,\bar{\delta}}{\bar{\sigma}}\right)^2 - \left(\frac{\bar{\sigma}}{\vartheta\, E}\right) = \frac{1}{448{,}8}\left(\frac{200 \cdot 8{,}586}{8{,}56}\right)^2 - \frac{8{,}56}{0{,}135} = 26\tfrac{1}{3}{}^0$$

Die Ermittlung des zweiten Gliedes $\left(\frac{\bar{\sigma}}{\vartheta\, E}\right)$ kann entfallen, wenn man in Tafel I Gebrauch macht von der $\left(\frac{\bar{\sigma}}{\vartheta\, E}\right)$-Skala, die in der Temperaturzähllinie Z ihren Nullpunkt hat. Auf dieser Wagrechten ist der Teilpunkt für $\bar{\sigma} = 8{,}56$ aufzusuchen und es ist von diesem Punkt aus das erste Glied $\frac{1}{24\,(10^6\vartheta)}\left(\frac{a\,\bar{\delta}}{\bar{\sigma}}\right)^2$ nach rechts abzutragen; damit ist Punkt A_{-5} festgelegt.

Temperatur- und Last-Zustand	-25^0	-15^0	-5^0	0^0	$+10^0$	$+20^0$	$+30^0$	$+40^0$	-5^0 plus Zusatzlast
	ohne Zusatzlast								
in d. Tafel markierter wirklicher Durchhangsprozentsatz φ $\left(\text{in } \frac{a}{100}\right)$	1,76 %	1,9 %	2,04 %	2,105 %	2,24 %	2,365 %	2,49 %	2,61 %	$\bar{\varphi} = \frac{a\,\bar{\delta}}{80} \cdot \frac{1}{\bar{\sigma}} = \frac{21{,}465}{8{,}56} = 2{,}505\ \%$
wirklicher Durchhang $f = \varphi \cdot \frac{a}{100}$	3,52 m	3,8 m	4,08 m	4,21 m	4,48 m	4,73 m	4,98 m	5,22 m $= f_{\max}$	$\bar{f} = a\,\bar{\varphi} = 5{,}01$ m
(Kombinierte) Seilbeanspruchung $\sigma = \frac{a\,\delta}{80\varphi} = \frac{9}{\varphi}$ in kg/mm²	5,11 kg/mm²	4,74 kg/mm²	4,41	4,275	4,02	3,81	3,615	3,45	$\bar{\sigma}$ = Ausgangsspannung = 8,56 kg/mm²
Seilzug $S = q \cdot \sigma = 143{,}5 \cdot \sigma$	$S_{-25} = 732$ kg	—	—	$S_{-5} = 632$ kg	—	—	—	$S_{+40} = 495$ kg	$\bar{S} = 1228_{\mathrm{kg}} = S_{\max}$

Fall II: Stahlaluminiumseil, im n allein abweichend von den Tafelannahmen (während die δ-, E-, ϑ-Werte der Verbundstoffe übereinstimmen).

Gegenüber Fall I soll das Verbundseil bloss eine stärkere Stahlseele bekommen; alles andere soll im wesentlichen gleich bleiben.

Stahlaluminiumseil-Durchmesser $d = 16{,}8$ mm
Stahlaluminiumseil-Gesamtquerschnitt $q = 174$ mm²
Al-Querschnitt $q_a = 134$ mm²
{34 Drähte à 2,24 mm ⌀}
Stahl-Querschnitt $q_s = 40$ mm²
{4 Drähte à 1,84 mm ⌀
10 Drähte à 1,93 mm ⌀}

Querschnittsverhältnis $n = \frac{q_a}{q_s} = 3{,}35$, $\frac{1}{n} = 0{,}2985$

Die kombinierten Festwerte (für das Seil als Ganzes) folgen (nach den österreichischen Freileitungsnormalien) aus Abb. 2 zu:

(Kombinierter) Seil-Eigengewichtswert $\delta = 4$ g/cm³
(Kombinierter) Seil-Elastizitätsmodul $E = 8300$ kg/mm² } $\vartheta E = 0{,}141$
(Kombinierter) Seil-Wärmedehnwert $\vartheta = 17 \cdot 10^{-6}$

Für Zusatzlast ($180\sqrt{d} = 738$ g/m) folgt als Einheitsgewicht einschliesslich Eislast $\bar{\delta} = \delta + \frac{738}{q} = 4 + \frac{738}{174} = 8{,}24$ g/cm³

Aneisungsverhältnis $\frac{\bar{\delta}}{\delta} = \frac{8{,}24}{4} = 2{,}06$.

Wir gehen aus von der Ermittlung der Grenzspannungen für Aluminiumausnützung:

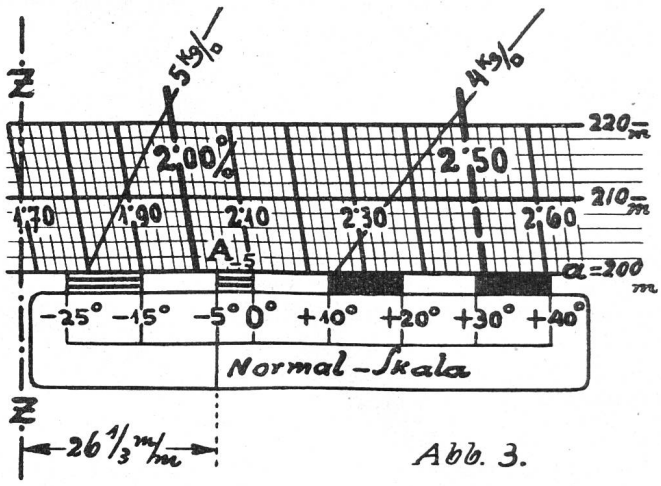


Abb. 3.

Die vorliegende Spannweite ist somit *ober*kritisch d. h.: Höchst-Aluminiumbeanspruchung und Höchstseilzug treten auf bei Zusatzlast, Ausgangsspannung $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}^{\circ}_{(G.)} = 9{,}53$ kg/mm².

Nach dem Singerverfahren würde also der Ausgangspunkt $\bar{A}_{-5}$ beim Schnitt der Parabel $\bar{\sigma} = 9{,}53$ mit der Wagrechten $za = 2{,}06 \cdot 200 = 412$ m liegen, falls Leiterfestwerte und Durchhangstafelannahmen in Uebereinstimmung wären. Da letztere Voraussetzung hier nicht zutrifft, ist umzurechnen, und zwar: die Ausgangsspannung mit dem Faktor $F_\sigma = 0{,}89$ (laut Hilfsdiagramm Tafel I für $n = 3{,}35$). Dann ist für den umgerechneten Spannungswert $\bar{\sigma}_{umg.} = 9{,}53 \cdot 0{,}89 = 8{,}48$ kg/mm² die Parabel einzuzeichnen; der Schnittpunkt der letzteren Parabel mit der Wagrechten $za = 412$ ist Ausgangspunkt

Grenzspannungen für *Al*-Ausnützung bei { *a)* Tiefsttemperatur und den kleinsten Spannweiten; *b)* Zusatzlast und den grössten Spannweiten }

a) bei Tiefsttemperatur (— 25 °) und Kleinstspannweiten	*b)* bei Zusatzlast und Grösstspannweiten
Stahl-Grenzspannung: $\sigma^{\circ}_{s,-25,(K.)} = \frac{E_s}{E_a} \cdot \sigma_{a,\max} + (\vartheta_a - \vartheta_s) E_s (t_{\min} - t_v) = \underbrace{\frac{18000}{5400}}_{1/3} \cdot 6{,}85 + \underbrace{(23-11)\,10^{-6} \cdot 18 \cdot 10^3}_{0{,}216} \cdot (-25-15) = 14{,}19$ kg/mm²	Stahl-Grenzspannung: $\bar{\sigma}^{\circ}_{s,(G.)} = \frac{E_s}{E_a} \sigma_{a,\max} + (\vartheta_a - \vartheta_s) E_s (\bar{t} - t_v) = \frac{6{,}85}{3} + 0{,}216\,(-5-15) = 18{,}51$ kg/mm²
Seil-Grenzspannung (kombinierte): $\sigma^{\circ}_{-25,(K.)} = \frac{\sigma_{a,\max}}{1+\frac{1}{n}} + \frac{\sigma^{\circ}_{-25,(K)}}{1+n} = \frac{6{,}85}{\underbrace{1+0{,}2985}_{5{,}275}} + \frac{14{,}19}{1+3{,}35} = 8{,}54$ kg/mm²	Seil-Grenzspannung (kombinierte): $\bar{\sigma}^{\circ}_{(G)} = \frac{\sigma_{a,\max}}{1+\frac{1}{n}} + \frac{\bar{\sigma}^{\circ}_{s,(G.)}}{1+n} = 5{,}275 + \frac{18{,}51}{4{,}35} = 9{,}53$ kg/mm²

$$a_{kr,B} = 100\sqrt{\frac{\bar{\sigma}^{\circ}_{(G.)} - \sigma^{\circ}_{-25,(K)} + \vartheta E\,[\bar{t} - t_{\min}]}{\frac{E}{2400}\left\{\left(\frac{\bar{\delta}}{\bar{\sigma}^{\circ}_{(G.)}}\right)^2 - \left(\frac{\delta}{\sigma_{-25,(K)}}\right)^2\right\}}} = 100\sqrt{\frac{9{,}53 - 8{,}54 + 0{,}141\,[-5-(-25)]}{3{,}458\left\{\left(\frac{8{,}24}{9{,}53}\right)^2 - \left(\frac{4}{8{,}54}\right)^2\right\}}} = 144{,}5\,\text{m}$$

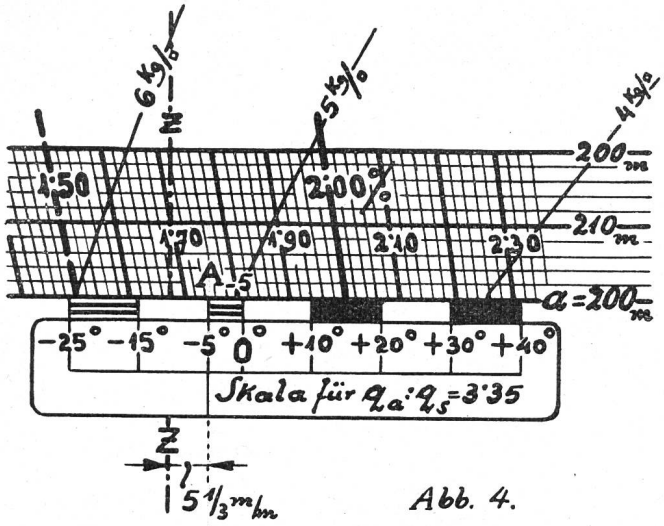


Abb. 4.

$\overline{A}_{-5}$, der herabgelotet wird auf Punkt A_{-5} (Abb. 4) [23]; hier ist (mit Skalenpunkt -5^0) die entsprechend (mit $F_t = 0{,}93$) umgerechnete bzw. aus dem Hilfsdiagramm Tafel I (für $n = 3{,}35$) unmittelbar abgegriffene Temperaturdifferenzenskala anzulegen; damit können wir ablesen die scheinbaren Durchhangsprozentsatzwerte φ_{Ta}:

Fall III: Stahlaluminiumseil, in allem abweichend von den Tafelannahmen (in n wie in den δ-, E-, ϑ-Werten der Verbundstoffe).

Diesem Fall soll das von Dr. Riedlinger (am angegebenen Orte) behandelte Ziffernbeispiel zugrundegelegt werden.

Gesamt-Seil-Durchmesser $d = 21$ mm
Gesamt-Seil-Querschnitt $q = 261{,}6$ mm²
Al-Querschnitt $q_a = 212{,}1$ mm²
(30 Drähte à 3 mm ⌀)
Stahl-Querschnitt $q_s = 49{,}5$ mm²
(7 Drähte à 3 mm ⌀)

Querschnittsverhältnis $n = \dfrac{q_a}{q_s} = 4{,}285, \quad \dfrac{1}{n} = 0{,}2334$

Für die Verbundstoffe sind die Festwerte der folgenden Tabelle vorausgesetzt:

[23]) Rechnerisch folgt der Abstand des Punktes A_{-5} von der Z-Linie aus:

$$Z \div A_{-5} = \frac{1}{24\,(10^6\,\vartheta_{Ta})}\left\{\frac{a\,(\varkappa\,\delta_{Ta})}{\overline{\sigma}_{umg.}}\right\}^2 - \left(\frac{\overline{\sigma}_{umg.}}{\vartheta_{Ta}\cdot E_{Ta}}\right) = \frac{1}{448{,}8}\left\{\frac{200\,(2{,}06\cdot 3{,}6}{8{,}48}\right\}^2 - \frac{8{,}48}{0{,}135} = 5\,{}^1/_3{}^\circ$$

[24]) Rechnerisch folgt hiefür:

$$\overline{\varphi}_{Ta} = \frac{a\,(\varkappa\,\delta_{Ta})}{80\cdot\overline{\sigma}_{umg.}} = \frac{200\cdot 2{,}06\cdot 3{,}6}{80\cdot 8{,}48} = 2{,}184\,\%.$$

Temperatur- und Last-Zustand	-25^0	-15^0	-5^0	0^0	$+10^0$	$+20^0$	$+30^0$	$+40^0$	-5^0 plus Zusatzlast
	ohne Zusatzlast								
In der Tafel markierter (scheinbarer) Durchhangsprozentsatz φ_{Ta}	1,485 %	1,615 %	1,745 %	1,81 %	1,94 %	2,065 %	2,19 %	2,31 %	$\overline{\varphi}_{Ta} = 2{,}185$ [24])

Hieraus folgen die wirklichen Durchhangsprozentsatzwerte φ $\left(\text{in } \dfrac{a}{100}\right)$ durch Multiplikation mit dem Faktor $F_\varphi = 0{,}989$ (der aus dem Hilfsdiagramm Tafel I abzulesen ist für $n = 3{,}35$):

Temperatur- und Last-Zustand	-25^0	-15^0	-5^0	0^0	$+10^0$	$+20^0$	$+30^0$	$+40^0$	-5^0 plus Zusatzlast
	ohne Zusatzlast								
In der Tafel markierter Durchhangsprozentsatz φ_{Ta}	1,485 %	1,615 %	1,745 %	1,81 %	1,94 %	2,065 %	2,19 %	2,31 %	$\overline{\varphi}_{Ta} = 2{,}185$ %
Wirklicher Durchhangsprozentsatz $\varphi = 0{,}989\,\varphi_{Ta}$	1,475 %	1,597 %	1,726 %	1,792 %	1,92 %	2,042 %	2,165 %	2,285 %	$\overline{\varphi} = 0{,}989\,\overline{\varphi}_{Ta} = 2{,}16$ %
Wirklicher Durchhang $f = \varphi\,\dfrac{a}{100}$	2,95 m	3,19 m	3,45 m	3,58 m	3,84 m	4,08 m	4,33 m	4,57 m $= f_{max}$	$\overline{f} = a\,\overline{\varphi} = 4{,}32$ m
Kombinierte Seilbeanspruchung $\sigma = \dfrac{a\,\delta}{80\,\varphi} = \dfrac{10}{\varphi}$ in kg/mm²	6,8	6,26	5,795	5,58	5,21	4,9	4,62	4,38	$\overline{\sigma}$ = Ausgangsspannung = 9,53 kg/mm²
Seilzug $S = \sigma\,q = \sigma\cdot 174$	$S = 1182$ -25 kg	—	$S = 1008$ -5 kg	—	—	—	—	$S = 762$ $+40$ kg	$\overline{S} = \overline{\sigma}\,q = 1655_{kg} = S_{max}$

$\delta_s = 7{,}95$ g/cm³	$E_s =$ 22,000 kg/mm²	$\vartheta_s = 11 \cdot 10^{-6}$
$\delta_a = 2{,}75$ g/cm³	$E_a =$ 7150 kg/mm²	$\vartheta_a = 23 \cdot 10^{-6}$
	$\frac{E_s}{E_a} = 3{,}077$ $\frac{E_a}{E_s} = 0{,}325$	$\vartheta_a - \vartheta_s = 12 \cdot 10^{-6}$

Aus den Gleichungen 1.) bis 3.) folgen die kombinierten Seil-Festwerte:

(Kombin.) Seil-Eigengewichtswert $\delta = 3{,}73$ g/cm³
(Kombin.) Seil-Elastizitätsmodul $E = 9960$ kg/mm²
(Kombin.) Seil-Wärmedehnwert $\vartheta = 17{,}96 \cdot 10^{-6}$

Für Zusatzlast ($180 \sqrt{d} = 180 \sqrt{21} = 825$ g/m) folgt das Einheitsgewicht einschliesslich Zusatzlast $\bar{\delta} = \delta + \frac{825}{q} = 3{,}73 + \frac{825}{261{,}6} = 6{,}88$ g/cm³; dem entspricht ein Aneisungsverhältnis $\varkappa = \frac{\bar{\delta}}{\delta} = \frac{6{,}88}{3{,}73} = 1{,}845$.

Angenommen sei eine Höchstbeanspruchung für *Al*: $\sigma_{a,\,max} = 9$ kg/mm².

Damit folgen die Grenzspannungen für Aluminiumausnützung:

Grenzspannungen für *Al*-Ausnützung bei { *a)* Tiefsttemperatur und den kleinsten Spannweiten; *b)* Zusatzlast und den größten Spannweiten }

a) bei Tiefsttemperatur (−25°) und Kleinstspannweiten

Stahl-Grenzspannung:

$$\sigma^\circ_{s,\,-25,\,(K.)} = \frac{E_s}{E_a} \cdot \sigma_{a,\,max} + (\vartheta_a - \vartheta_s)\, E_s\, (t_{min} - t_v) = \underbrace{3{,}077 \cdot 9}_{27{,}69} + \underbrace{12 \cdot 10^{-6} \cdot 22 \cdot 10^3}_{0{,}264} (-25 - 15) = 17{,}143 \text{ kg/mm}^2$$

Seil-Grenzspannung (kombinierte):

$$\sigma^\circ_{-25,\,(K.)} = \frac{\sigma_{a,\,max}}{1 + \frac{1}{n}} + \frac{\sigma^\circ_{s,\,-25,\,(K.)}}{1 + n} = \underbrace{\frac{9}{1 + 0{,}2334}}_{7{,}3} + \frac{17{,}14}{1 + 4{,}285} = 10{,}54 \text{ kg/mm}^2$$

b) bei Zusatzlast und Grösstspannweiten

Stahl-Grenzspannung:

$$\bar{\sigma}^\circ_{s,\,(G.)} = \frac{E_s}{E_a} \cdot \sigma_{a,\,max} + (\vartheta_a - \vartheta_s)\, E_s\, (\bar{t} - t_v) = 27{,}69 + 0{,}264\,(-5 - 15) = 22{,}413 \text{ kg/mm}^2$$

Seil-Grenzspannung (kombinierte):

$$\bar{\sigma}^\circ_{(G.)} = \frac{\sigma_{a,\,max}}{1 + \frac{1}{n}} + \frac{\bar{\sigma}^\circ_{s,\,(G.)}}{1 + n} = 7{,}3 + \frac{22{,}41}{1 + 4{,}285} = 11{,}54 \text{ kg/mm}^2$$

Damit ist einzugehen in die Berling'sche Gleichung für die kritische Spannweite:

$$a_{kr,\,B} = 100 \sqrt{\frac{\bar{\sigma}^\circ_{(G.)} - \sigma^\circ_{-25,\,(K.)} + \vartheta\, E\, (\bar{t} - t_{min})}{\frac{E}{2400}\left\{\left(\frac{\bar{\delta}}{\bar{\sigma}^\circ_{(G.)}}\right)^2 - \left(\frac{\delta}{\sigma_{-25,\,(K.)}}\right)^2\right\}}} = 100 \sqrt{\frac{11{,}54 - 10{,}54 + 0{,}1789 \cdot 20}{4{,}15\left\{\left(\frac{6{,}88}{11{,}54}\right)^2 - \left(\frac{3{,}73}{10{,}54}\right)^2\right\}}} = 219_m > a$$

Oberkritisch ist also die Spannweite nicht. Um festzustellen, ob sie gemischtkritisch ist oder unterkritisch, müssen wir eingehen in die Weil'sche Gleichung für die kritische Spannweite:

$$a_{kr} = \sigma_{max} \cdot \sqrt{\frac{24\,(10^6\,\vartheta)\,[\bar{t} - t_{min}]}{\bar{\delta}^2 - \delta^2}} = \sigma^\circ_{-25,\,(K.)} \cdot 4{,}9 \sqrt{\frac{10^6\,\vartheta\,[\bar{t} - t_{min}]}{\bar{\delta}^2 - \delta^2}} = 10{,}54 \cdot 4{,}9 \sqrt{\frac{17{,}96\,[-5 - (-25)]}{6{,}88^2 - 3{,}73^2}} = 169{,}5_m < a$$

Somit ist die vorliegende Spannweite gemischtkritisch d. h.: Ausgangspunkt für die Zustandsgleichung oder eine Durchhangstafel ist die Tiefsttemperatur-Grenzspannung $\sigma_{-25} = \sigma^\circ_{-25,\,(K.)} = 10{,}54$ kg/mm²; dagegen wird der Höchstseilzug erreicht bei Zusatzlast, und zwar bleibt die Höchstseilspannung unter dem Extremwert „Grenzseilspannung für *Al*-Ausnützung bei Zusatzlast $\bar{\sigma}^\circ_{(G.)}$."

Im Singerdiagramm ist, da der allgemeinste Fall (durchwegs von der Tafel abweichende Festwerte) vorliegt, alles umzurechnen: Ausgangsspannung, Temperaturdifferenzskala und Durchhangswerte. Die Umrechnungsfaktoren sind:

$$\text{für Spannung: } F\sigma = \sqrt[3]{93{,}57 \left\{ \frac{1}{\frac{E}{1000} \cdot \delta} \right\}} = \sqrt[3]{93{,}57 \left\{ \frac{1}{9{,}96 \cdot 3{,}73} \right\}} = 0{,}8776$$

$$\text{für Temperatur: } F_t = \frac{\vartheta}{18{,}7 \cdot 10^{-6}} \sqrt[3]{\left\{ 0{,}4986 \frac{\frac{E}{1000}}{\delta} \right\}^2} = \frac{17{,}96}{18{,}7} \sqrt[3]{\left\{ 0{,}4986 \cdot \underbrace{\frac{9{,}96}{3{,}73}}_{2{,}67} \right\}^2} = 1{,}157$$

$$\text{für Durchhang: } F\varphi = \sqrt[3]{\frac{1}{\left(\frac{\frac{E}{1000}}{\delta} \right)}} \cdot 2{,}0055 = \sqrt[3]{\frac{1}{2{,}67}} \cdot 2{,}0055 = 0{,}9076$$

Die *umgerechnete Ausgangsspannung* ist also $\sigma_{\text{umg.}} = F_\sigma \cdot \sigma_{-25^0} = 0{,}8776 \cdot 10{,}54 = 9{,}25$ kg/mm²; die diesem Wert entsprechende Parabel (Abb. 5) ist zum Schnitt zu bringen mit der Wagrechten $a = 200_m$; dies ergibt den Ausgangspunkt A_{-25}. Hier ist mit dem Skalenpunkt -25^0 anzulegen jene Skala, die man erhält aus der Umrechnung mit $F_t = 1{,}157$; Anlegskalenlänge ist also $(-25^0 + 40^0) \cdot 1{,}157 = 75{,}2$ mm; damit folgen die Tafelablesungen φ_{Ta} der nachstehenden Tabelle; die wirklichen Durchhangsprozentsatz-Werte $\varphi \left(\text{in } \frac{a}{100}\right)$ folgen aus der Multiplikation mit Umrechnungsfaktor $F\varphi = 0{,}9076$.

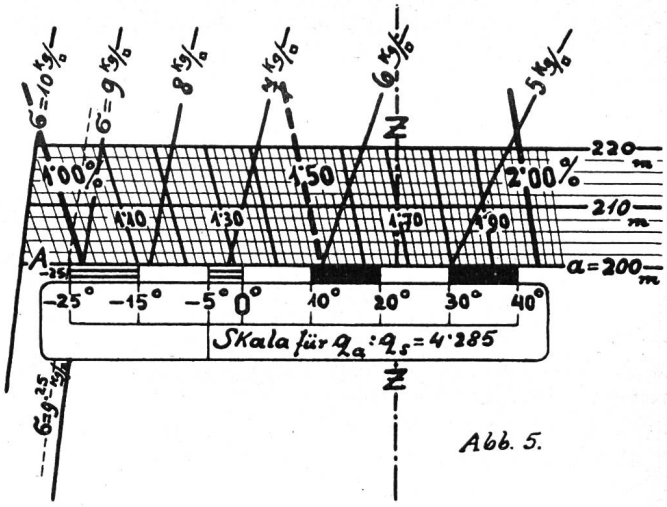


Abb. 5.

Temperatur- und Last-Zustand	−25°	−15°	−5°	0°	+10°	+20°	+30°	+40°	−5° plus Zusatzlast
	ohne Zusatzlast								
In der Tafel markierter Durchhangsprozentsatz φ_{Ta}	0,975 %	1,1 %	1,243 %	1,32 %	1,475 %	1,635 %	1,795 %	1,955 %	$\bar{\varphi}_{Ta} = 1{,}69$ % [25]
Wirklicher Durchhangsprozentsatz $\varphi = 0{,}9076\, \varphi_{Ta}$	0,885 %	0,998 %	1,128 %	1,198 %	1,339 %	1,484 %	1,63 %	1,775 %	$\bar{\varphi} = 0{,}9076\, \bar{\varphi}_{Ta} = 1{,}538$ %
Wirklicher Durchhang $f = \varphi \frac{a}{100}$	1,77 m	2,00 m	2,26 m	2,40 m	2,68 m	2,97 m	3,26 m	2,55 m	$\bar{f} = 3{,}17$ m $= f_{max}$
Kombinierte Seilbeanspruchung $\sigma = \frac{a\,\delta}{80\,\varphi} = \frac{9{,}325}{\varphi}$ in kg/mm²	10,54 = wirkliche Ausgangsspannung	9,34	8,27	7,78	6,95	6,28	5,72	5,25	$\bar{\sigma} = \frac{a\,\bar{\delta}}{80\,\bar{\varphi}} = \frac{17{,}2}{\bar{\varphi}} = 11{,}18$
Seilzug $S = \sigma\, q = \sigma \cdot 261{,}6$	$S = 2757$ kg (−25)	—	$S = 2470$ kg (−5)	—	—	—	—	$S = 1574$ kg (+40)	$\bar{S} = \bar{\sigma}\, q = 2930_{kg} = S_{max}$

[25]) Dieser Wert ergibt sich durch Hinaufloten des Punktes A_{-5} bis zum Schnitt mit der Wagrechten $xa = 1{,}845 \cdot 200 = 369_m$.